



Pulsed UV 처리수에서의 자연유기물질, 잔류염소 및 소독부산물 생성 거동 Behavior of Natural Organic Matter(NOM), Chlorine Residual, and Disinfection By-Products(DBPs) Formation in Pulsed UV Treated Water

손진식 · 한지희*

Jinsik Sohn · Jihee Han*

국민대학교 건설시스템공학부

(2012년 6월13일 접수; 2012년 10월11일 수정; 2012년 10월12일 채택)

Abstract

UV technology is widely used in water and wastewater treatment. Many researches have been conducted on microbial disinfection and micro pollutant reduction with UV treatment. However, the study on NOM with UV has limited because low/medium pressure UV lamp is not sufficient to affect refractory organics such as NOM.

Pulsed UV treatment using UV flash lamp can be operated in the pulsed mode with much greater peak intensity. The pulse duration is typically in microseconds, whereas the interval between pulses is in the order of milliseconds. The high intensity of pulsed UV would mineralize NOM itself as well as change the characteristics of NOM. Chlorine demand and DBPs formation is affected on the changed amounts and properties of NOM. The objective of this study is to investigate the effect on NOM, chlorine residual, and chlorinated DBPs formation with pulsed UV treatment.

Key words : Pulsed UV(Ultraviolet), NOM(Natural Organic Matter), Molecular Weight Distribution, Chlorine Residual, DBPs(Disinfection By-Products)

주제어 : 펄스 UV, 자연 유기 물질, 분자량 분포, 잔류염소, 소독부산물

1. 서론

정수처리의 주요목적은 인체에 유해한 물질을 제거하고, 병원성 미생물에 대한 소독을 통하여 안전한 물을 공급하는데 있다. 정수처리장에서는 염소를 가장 일반적인 소독제로 사용하고 있으나, *Cryptosporidium*과 *Giardia*와 같은 염소내성이 강한 원생동물에 대해서는 충분한 소독효과를 얻기 어렵다. 자외선(ultraviolet, UV) 처리는 염소소독으로 효과를 얻기가 어려운 원생동물

에 대한 소독효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다 (Lorenzo-Lorenzo et al., 1993; Campbell et al., 1995; Bukhari et al., 1999).

또한, UV 처리는 THMs(trihalomethanes)과 HAAs(haloacetic acids)와 같은 소독부산물(disinfection by-products, DBPs)을 발생시키지 않고 맛, 냄새 유발물질의 제거에도 효과가 있어 정수처리장에 소독 또는 산화공정으로 도입이 확대되고 있다. UV 처리는 초순수 제조공정에서 미량 유기물을 산화시키는 역할을 수행

*Corresponding author : Tel.: +82-2-910-5060, Fax : +82-2-910-8597, E-mail : sp1756@kookmin.ac.kr(J. H. Han)

하기도 한다(Allard et al., 1994; Dahlen et al., 1996; Frimmel, 1998; Thomson et al., 2004; Sarathy and Mohseni, 2007; Torr and Mohseni, 2007). 이러한 장점에도 불구하고 UV는 잔류성이 없어, 상수도에서는 관망에서 병원성 미생물의 재번식을 방지하기 위하여 UV 소독후에 추가적으로 잔류성을 갖는 소독제(염소나 클로라민 등)를 주입해야 하는 단점이 있다.

UV 공정에서는 수은(mercury)램프를 많이 사용하고 있으나, 환경 유해 가능성이 있는 수은램프의 단점을 상쇄하고 처리효과를 극대화할 수 있는 제논(xenon) 램프에 대한 관심이 커지고 있다(Otaki et al., 2003; Bohrerova et al., 2008). 최근에는 파장 200nm 이하에서부터 300nm 이상의 광범위한 대역에서 순간적으로 고강도를 방출할 수 있는 pulsed UV 장치가 개발되어, 미생물 소독, 미량유해물질 및 이취미 물질제거 등 다양한 연구가 진행되고 있다(Mofidi et al., 2001; Liu et al., 2002; Liang et al., 2003; Bohrerova et al., 2008; 안영석 외, 2009; 정의택 외, 2011).

광대역 파장에서 높은 조사강도를 발현할 수 있는 pulsed UV 장치는, 저압 및 중압 UV에서는 기대하기 어려운 유기물의 특성변화 및 제거효과를 기대할 수 있으며, 후속적인 염소소독에 의한 잔류염소 및 소독부산물 생성 거동에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 연구에서는 pulsed UV 처리에 의한 자연유기물질(natural organic matter, NOM)의 특성변화와 제거효과에 대하여 고찰하고, 잔류염소와 소독부산물(THMs 및 HAAs)의 거동변화를 파악하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료 특성

실험에는 Suwannee river humic acid(SRHA, IHSS-2S101H)와 Suwannee river fulvic acid(SRFA, IHSS-2S101F)를 5mg/L(질량 기준)

로 초순수에 용해시켜 사용하였다. 실험에 사용한 시료의 수질은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of raw water

	pH	DOC* (mg/L)	Turbidity (NTU)	UVA ₂₅₄ (cm ⁻¹)	NH ₃ -N (mg/L)
SRHA	6.39	2.423	0.139	0.141	0.272
SRFA	5.19	2.508	0.066	0.111	0.242

* C ratio(International Humic Substance Society) : SRHA(2S101H) 52.63%, SRFA(2S101F) 52.34%

2.2 실험장치

Pulsed UV 장치는 power supply, 램프, 반응조로 구성되어 있다(Fig. 1). Power supply에서 1,800V, 10Hz의 전류를 공급하여 램프에서 강력한 UV가 발생하도록 하였고 램프는 제논을 충전하여 순간적으로 MW급의 출력을 낼 수 있도록 하였다. 1회 유효용량 4L(1개의 램프 사용)를 처리할 수 있는 반응조를 사용하였고 램프를 석영관 없이 시료에 직접 접촉시켜 실험하였다.

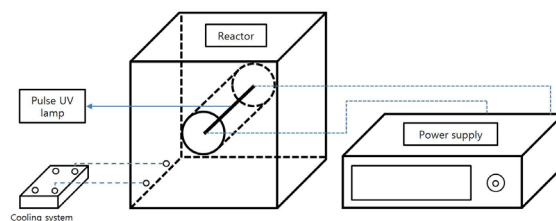


Fig. 1. A schematic of pulsed UV system

2.3 실험방법

실험실 조건에서 SRHA와 SRFA를 각각 0초, 5초, 60초, 3분, 5분 동안 pulsed UV 처리하고, 각각의 시료의 UVA₂₅₄와 DOC의 값을 측정하였다. 또한 pulsed UV 처리로 인한 분자량 분포 변화를 분석하였다. Pulsed UV 처리된 시료에서의 잔류염소 거동 측정을 위하여 차아염

소산나트륨(NaOCl)을 10mg/L 주입하여 소독제의 거동을 분석하였고, 최대 소독부산물 생성능을 볼 수 있는 FP(Formation potential) 조건($Cl_2/DOC=3$, 20°C, pH 7, 168hrs)에서 소독부산물(THMs, HAAs)을 분석하였다.

2.4 분석항목 및 방법

2.4.1 분자량 분포 분석

본 연구에서는 HPLC-UVA-DOC system을 이용하여 분자량 분포를 분석하였다. HPLC-UVA-DOC system은 HPLC(High performance liquid chromatograph, HPLC, LC-20AD, Shimadzu), HPLC에 내장된 UVA 검출기(SPD-20AD, Shimadzu)와 이에 연결된 DOC 분석기(820 turbo, Siverse)로 구성하였고, 크기 배제 컬럼(size exclusion column)을 이용하여 분리하였다. 사용한 컬럼의 분석범위는 100 ~ 10,000dalton이다.

2.4.2 잔류염소 측정

Hach사의 pocket chlorimeter를 사용하여 DPD법으로 유리잔류염소를 측정하였다. 샘플 셀에 10mL의 시료를 채우고 발색 지시약을 첨가한 후 20초 동안 흔들어서 혼합했을 때 유리잔류염소가 존재하면 핑크색으로 발색되는데 이를 1분 이내에 판독하여 농도를 측정하였다. 최저 검출한계는 0.01mg/L이다.

2.4.3 소독부산물 측정

본 연구에서는 염소계 소독부산물인 THMs와 HAAs의 생성량을 측정하기 위하여 Shimadzu사의 gas chromatography(GC-2010)를 사용하였다. DB-1 컬럼을 사용하여 4가지 종류($CHCl_3$, $CHCl_2Br$, $CHClBr_2$, $CHBr_3$)의 THMs과 9가지 종류(TCAA, DCAA, MCAA, CDBAA, BDCAA, BCAA, TBAA, DBAA, MBAA)의 HAAs를 전자포획 검출기(electron

capture detector, ECD)로 검출하였다. THMs의 분석은 EPA method 551, HAAs 분석은 EPA method 522.2를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Pulsed UV 조사시간에 따른 UVA_{254} 와 DOC의 변화

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 pulsed UV 처리시간에 따른 UVA_{254} 와 DOC의 변화를 나타내고 있다. UVA_{254} 와 DOC 모두 pulsed UV 처리시간이 길어질수록 더 많이 제거되었다. SRHA와 SRFA를 용해시킨 시료에 5분 동안 pulsed UV를 조사했을 때, UVA_{254} 는 각각 95%와 94%가 제거되었고, DOC는 각각 86%, 90%가 제거되었다.

미생물의 소독과 달리 UV에 의한 유기물 반응은 주로 200nm 이하에서 일어나며, 장시간 UV로 처리하는 경우에만 영향이 있는 것으로 알려져 있다(Thomson et al., 2002a; Thomson et al., 2002b; Parkinson et al., 2003).

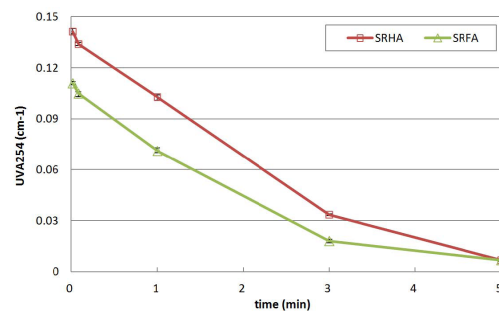


Fig. 2. UVA_{254} with pulsed UV irradiation time

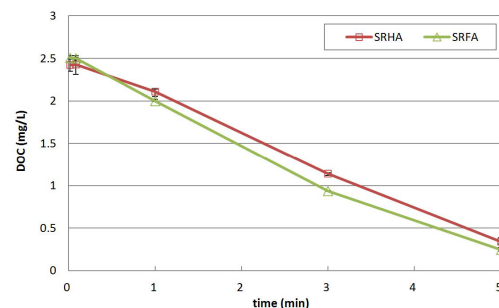


Fig. 3. DOC with pulsed UV irradiation time

Imoberdorf et al. (2011)은 소독에 이용하는 254nm 단일파장의 UVC 램프를 이용하여 3시간 동안 조사한 경우 TOC는 제거가 되지 않고, UVA₂₅₄는 25%가 제거된다고 보고하고 있다. 기존의 저압, 중압 램프로 유기물의 제거 및 특성 변화를 일으키기 위해서는 수시간의 UV 반응시간을 필요로 하지만, 본 연구에서 사용한 광대역 파장에서 고강도를 발현하는 pulsed UV는 짧은 시간에 상당한 양의 유기물 제거가 가능함을 보여주고 있다.

3.2 Pulsed UV 조사시간에 따른 분자량 분포 분석

Pulsed UV 조사시간에 따른 분자량 분포를 파악하기 위하여 SRHA, SRFA를 용해시킨 시료를 각각 0초, 5초, 60초, 3분, 5분 동안 pulsed UV를 조사한 후, HPLC-UVA-DOC system으로 분석하였다.

Fig. 4는 각 시료의 분자량 분포에 따른 UVA(254nm)의 값을 나타내고 있다. Pulsed UV의 조사시간이 길어질수록 UVA로 측정된 유기물 농도는 감소하는 경향을 보였다. UV 조사시간이 5초, 60초 인 경우 큰 분자량(1,000dalton 이상)을 가지는 물질이 많이 줄어들었고, 작은 분자량(300 ~ 800dalton)의 물질은 조금 증가하는 것으로 보아 큰 분자량의 물질이 작은 분자량의 물질로 일부 변환하는 것으로 유추할 수 있다. Pulsed UV를 장시간(3분, 5분) 조사한 시료에서는 1,000dalton 이하의 작은 분자량의 영역에서도 UVA의 제거를 확인할 수 있었다.

UVA 측정기는 유기물 중 방향족(aromatic)을 포함한 탄소이중결합 구조의 물질을 측정하는 것이기 때문에, 실제 유기물질의 농도를 나타내기 위하여 DOC 측정기를 사용하여 유기물질의 농도를 측정하였다. Fig. 5는 각 시료의 분자량 분포에 따른 DOC값을 나타내고 있다. SRHA와 SRFA 모두 짧은 조사 시간(5초)에서도 유기물 감소가 일어나고 있음이 관찰되었다.

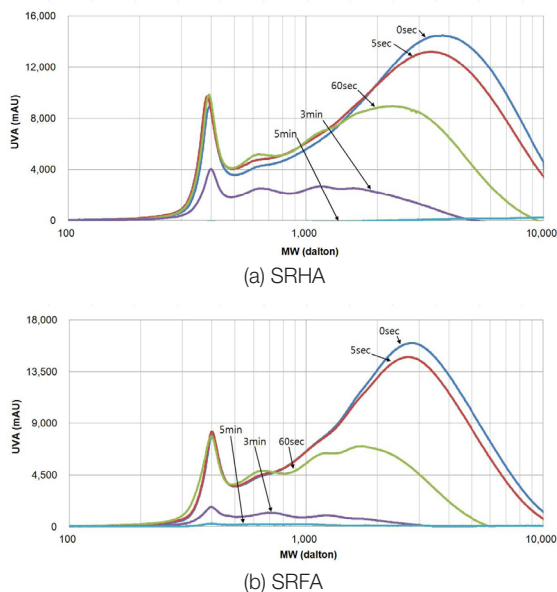


Fig. 4. Change of MW distribution through pulsed UV irradiation time with UVA detector

분자량 분포를 정량적으로 표현하기 위하여 0 ~ 1,460dalton, 1,460 ~ 10,000dalton으로 나누어 면적의 넓이를 구하고 제거율을 비교했다. PUV를 5분 동안 조사했을 때, 1,460dalton 이상의 큰 분자량의 경우 SRHA는 99.9%, SRFA는 99.7%가 제거되었고, 1,460dalton 이하의 작은 분자량의 경우 SRHA는 80.6%, SRFA는 91.7%가 제거되었다. 이러한 결과는 조사된 UV가 유기물의 성분에 선택적으로 작용한다는 것을 나타낸다.

DOC로 측정된 분자량 분포에서 가장 특징적인 것은 60초와 3분 동안 처리된 시료에서 나타나고 있다. 60초와 3분 처리한 시료의 경우, 200 ~ 900dalton 범위에서 처리전 시료와 5초 처리한 시료에 비해 DOC값이 크게 증가하고 있다. 이러한 결과는 pulsed UV 조사를 통해 큰 분자량의 유기물이 작은 분자량을 갖는 유기물질로 변환되는 과정이 60초에서 3분 사이에서 집중적으로 발생하고 있음을 나타낸다. 200 ~ 900dalton 범위의 분자량에서 DOC 값이 크

게 증가하는 것과는 대조적으로 UVA로 측정된 유기물 농도는 조금 증가하고 있는 것으로 보아 (Fig. 4), 이 분자량 범위에서 유기물질 증가는 대부분 단일 탄소결합을 갖는 지방족(aliphatic) 물질에 기인하는 것으로 판단된다(Her et al., 2003).

더욱 장시간(5분) 처리된 시료에서는 전 분자량에서 DOC값이 감소하는 것으로 나타나, 일정 시간 이상의 장시간 UV 조사에서는 큰 분자에서 작은 분자로의 변환작용 보다는 분자량 전 영역에서 유기물의 산화가 일어나는 것으로 해석된다. 또한 장시간(5분) 처리시 Fig. 4에서 UVA 측정값은 거의 나타나지 않고 있으나, Fig. 5에서는 1,000dalton 이하의 작은 분자량 영역에서 DOC 측정값이 나타나고 있는 것으로 보아, 장시간 UV 처리로 인해서 큰 분자량을 갖는 방향족 및 탄소 이중결합 물질은 모두 지방족 물질로 변환된 것으로 볼 수 있다.

3.3 Pulsed UV 처리수에서의 잔류염소 거동 분석

UV 처리수에 대하여 잔류염소의 거동을 분석하기 위해 SRHA, SRFA를 용해시킨 시료를 각각 0초, 5초, 60초, 3분, 5분 동안 pulsed UV 처리 후, 차아염소산나트륨(NaOCl)을 10mg/L 주입하여 잔류염소 농도를 측정하였다.

Fig. 6는 pulsed UV 처리를 한 SRHA와 SRFA에서의 잔류염소의 거동을 나타내고 있다. SRHA(Fig. 6 (a))의 경우, pulsed UV를 처리하지 않은 시료와 5초, 60초 동안 처리한 시료의 경우의 염소소모량(주입염소량에서 잔류염소량을 뺀 값)은 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. SRFA(Fig. 6 (b))의 경우에도 UV 미처리 시료와 5초, 60초 조사한 시료의 잔류염소 거동은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 3분, 5분 동안 처리한 SRHA, SRFA 시료에서는 처리하지 않은 시료에 비해 염소소모량이 적게 나타났으며, pulsed UV 조사시간이 늘어날수록 효과가 더욱 크게 나타났다. 이러한 결과는 UV 처리에 의해 유기물의

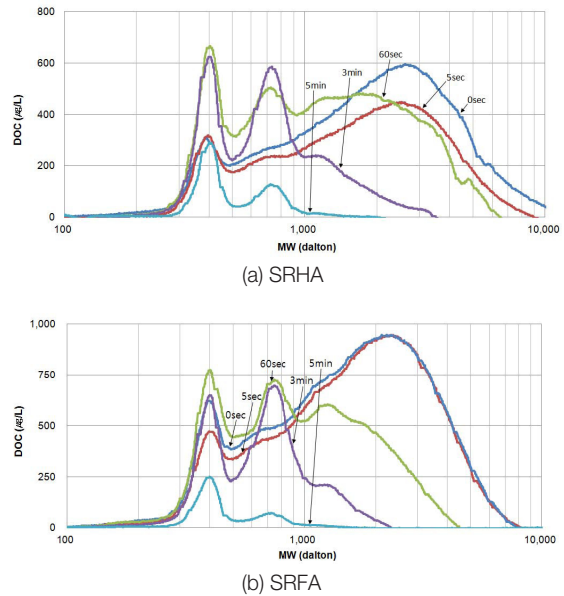


Fig. 5. Changed of MW distribution through pulsed UV irradiation time with DOC detector

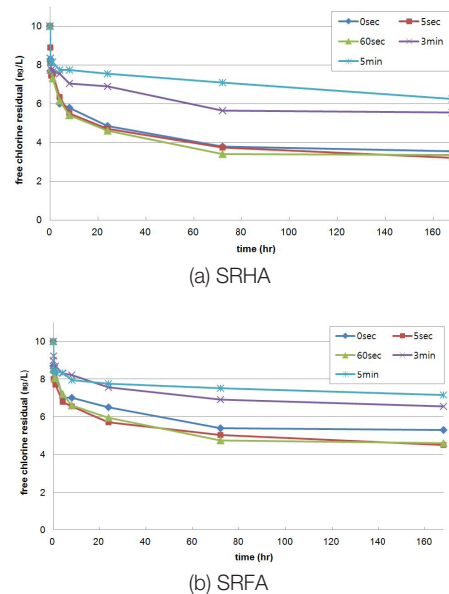


Fig. 6. Chlorine residual with pulsed UV irradiation time

제거와 특성변화로 염소소모량이 작아지고, 이에 따라 잔류염소 농도를 높게 유지할 수 있게 되므로 관망에서의 적정 잔류염소 농도를 유지하기 유리한 조건을 제공할 수 있음을 의미한다.

3.4 Pulsed UV 처리수에서의 소독부산물 생성 분석

SRHA와 SRFA를 용해시킨 시료를 pulsed UV 처리한 후 $Cl_2/DOC=3$ 으로 차아염소산나트륨($NaOCl$)을 주입하여 시료를 $20^\circ C$ 에서 7일 보관한 후 THMs과 HAAs를 측정하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 pulsed UV 처리를 한 SRHA, SRFA에서의 THMs와 HAAs 생성량을 보여준다. SRHA와 SRFA에서의 THMs의 생성량을 보면 pulsed UV를 5초, 60초 조사한 시료에서는 처리하지 않은 시료보다 오히려 THMs 생성량이 많았고, 3분, 5분 조사한 시료에서는 pulsed UV를 조사하지 않은 시료보다 THMs이 적게 생성되었다. Pulsed UV 처리를 통해 SRHA에서는 THMs 생성이 최대 73%가 감소하였고, SRFA에서는 최대 97%가 감소하였다. SRHA와 SRFA에서의 HAAs는 pulsed UV 처리시간이 증가할수록 적게 생성되는 경향을 보였다. Pulsed UV 처리를 통해 SRHA에서는 HAAs 생성이 최대 80%가 감소하였고, SRFA에서는 최대 93%가 감소하였다. Liu et al. (2002)은 $1,000mJ/cm^2$ 이하로 UV 조사한 후 염소처리를 했을 경우 THMs와 HAAs 생성에 영향을 미치지 않는다고 발표하였는데, 이는 낮은 UV 조사량으로는 소독부산물의 전구물질인 유기물의 제거나 특성변화를 유발하기는 한계가 있음을 의미한다. 본 연구에서는 pulse UV에 의해 유기물 제거와 이에 따른 DBPs 저감이 크게 나타나고 있으며, 이러한 사실은 pulse UV 처리가 유기물제거와 DBPs 제어에 적용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

전반적으로 UV 처리에 따른 THMs와 HAAs 감소 경향은 유사하게 나타나고 있으나, UV 처리시간이 짧은 경우(5초, 60초)에서는 THMs 생성이 오히려 증가하고 있는 반면, HAAs 생성은 감소하는 경향을 나타내고 있다. THMs의 생성은 작용기의 영향을 많이 받으며, 대표적인

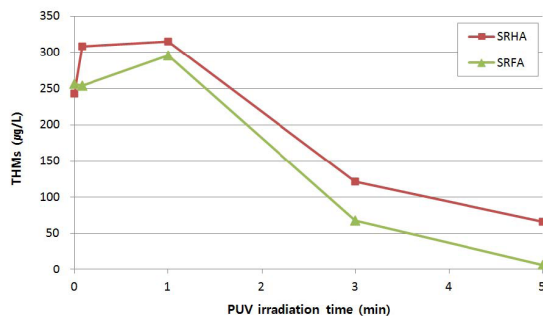


Fig. 7. THMs formation with pulsed UV irradiation time

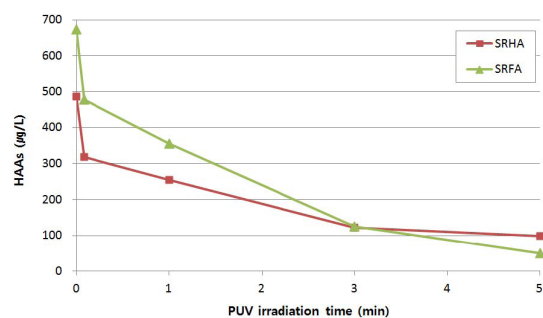


Fig. 8. HAAs formation with pulsed UV irradiation time

THMs 전구물질인 meta-dihydroxybenzene 구조를 많이 함유한 저분자 유기탄소들이 저분자 유기물질에 많이 포함되어 있어서 작은 분자량의 물질에서 생성능이 높다고 알려져 있다(Larson and Weber, 1994; Sinha et al., 1997; 손희중 등, 2004; Sohn et al., 2007). Fig 4에 나타난 UV 조사시간에 따른 분자량 분포를 보면 짧은 처리시간 동안 UV 처리를 통한 시료의 300 ~ 800dalton의 유기물질의 양이 증가했다는 것을 알 수 있는데 이것이 THMs의 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다.

HAAs의 경우는 큰 분자량의 물질이 많을 때 생성량이 크다고 보고되고 있다(Sinha et al., 1997; Sohn et al., 2007). UV 조사시간이 늘어날수록 1,100dalton이상의 높은 분자량의 물질이 급격하게 제거되고 있어(Fig. 4, 5) HAAs의 생성량이 지속적으로 감소하는 것으로 분석된다.

4. 결론

본 연구에서는 pulsed UV 처리시간에 따른 NOM의 제거와 이에 따른 잔류염소의 거동 변화와 소독부산물 생성 변화를 고찰하였다.

1. Pulsed UV 처리로 유기물질(DOC)을 상당히 감소시킬 수 있었다. NOM 표준시료(Suwannee river humic acid 및 fulvic acid; SRHA, SRFA)를 대상으로 5분간 UV 처리했을 때 DOC를 85% 이상 제거할 수 있었다.
2. 60초와 3분 처리한 시료의 경우, 200 ~ 900dalton 범위에서 DOC값이 크게 증가하고 있다. 이러한 결과는 pulsed UV 조사를 통해 큰 분자량의 유기물이 작은 분자량을 갖는 유기물질로 변환되는 과정이 60초에서 3분 사이에서 집중적으로 발생하고 있다는 것을 나타내며, 동 분자량 범위에서의 유기물질 증가는 대부분 단일 탄소결합을 갖는 지방족 물질에 기인하는 것으로 판단된다.
3. Pulsed UV 처리수에서의 잔류염소의 거동은 UV 조사시간 1분 이하에서는 잔류염소 소모량이 크게 변화하지 않았으나, 장시간(3분, 5분) 조사 후에는 잔류염소 소모량이 크게 감소하였다.
4. 짧은 시간 UV를 조사(5초, 60초)한 경우 UV를 조사하지 않은 시료보다 오히려 THMs이 많이 생성되었으며, 장시간 조사(3분, 5분)한 시료에서는 THMs이 크게 감소하였다. 반면 HAAs의 경우 UV 조사시간이 늘어날수록 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있어, 소독부산물 생성이 유기물의 농도뿐만 아니라 특성과도 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

본 연구결과 pulsed UV를 장시간(3분 이상) 처리하는 경우 효과적인 유기물 제거가 가능하며, 유기물 특성변화와 이에 따른 소독제와 소독부산물의 거동에도 큰 변화가 있는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 NOM 표준시료를 사용하였으며, 향후 자연수를 이용한 다양한 조건에서 후속 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Allard, B., Boren, H., Petterson, C. and Zhang, G. (1994) Degradation of humic substances by UV irradiation, *Environment International*, **20**, pp.97-101.
- Bohrerova, Z., Shemer, H., Lantis, B., Impelleri, C. and Linden, K.G. (2008) Comparative disinfection efficiency of pulsed and continuous-wave UV irradiation technologies, *Water Research*, **42**(12), pp.2975-2982.
- Bukhari, Z., Hargy, T.M., Bolton, J.R., Dussert, B. and Clancy, J.L. (1999) Medium-pressure UV for oocyst inactivation, *Journal of the American Water Works Association*, **91**(3), pp.86-94.
- Campbell, A.T., Robertson, L.J., Snowball, M.R. and Smith, H.V. (1995) Inactivation of oocysts of *Cryptosporidium parvum* by ultraviolet irradiation, *Water Research*, **29**(11), pp.2583-2586.
- Dahlen, J., Bertilsson, S. and Pettersson, C. (1996) Effects of UV-A irradiation on dissolved organic matter in humic surface waters, *Environment International*, **22**, pp.501-506.
- Frimmel, F. H. (1998) Impact of light on the properties of aquatic natural organic matter, *Environment International*, **24**, pp.559-571.
- Her, N., Amy, G., McKnight, D., Sohn, J., and Yoon, Y. (2003) Characterization of DOM as a function of MW by fluorescence EEM and HPLC-SEC using UVA, DOC, and fluorescence detection, *Water Research*, **37**, pp.4295-4303.
- Imoberdorf, G. and Mohseni, M. (2011) Degradation of natural organic matter in surface water using vacuum-UV irradiation, *Journal of Hazardous Materials*, **186**, pp.240-246.

- Larson, R.A. and Weber, E.J. (1994) *Reaction mechanisms in environmental organic chemistry*, Lewis Publishers, MI
- Liang, S., Min, J.H., Davis, M.K., Green, J.F. and Remer, D.S. (2003) Use of pulsed-UV processes to destroy NDMA, *Journal of the American Water Works Association*, **95**(9), pp.121-131.
- Liu, W., Andrews, S.A., Bolton, J.R., Linden, K.G., Sharpless, C. and Stefan, M. (2002) Comparison of disinfection by-product (DBP) formation from different UV technologies at bench scale, *Water Science and Technology: Water Supply*, **2**(5-6), pp.515-521.
- Lorenzo-Lorenzo, M.J., Ares-Mazas, M.E., Villacorta-Martinez de Maturana, I. and Duran-Oreiro, D. (1993) Effect of ultraviolet disinfection of drinking water on the viability of *Cryptosporidium parvum* oocysts, *Journal of Parasitology*, **79**(1), pp.67-70.
- Mofidi, A.A., Baribeau, H., Rochelle, P.A., Ricardo de Leon, Coffey, B.M., Green, J.F., Disinfection of *Cryptosporidium parvum* with polychromatic UV light, *Journal of the American Water Works Association*, **93**(6), 95-109, 2001
- Otaki, M., Okuda, A., Tajima, K., Iwasaki, T., Kinoshita, S. and Ohgaki, S. (2003) Inactivation differences of microorganisms by low pressure UV and pulsed xenon lamps, *Water science and technology*, **47**(3), pp.185-190.
- Parkinson, A., Roddick, F.A. and Hobday, M.D. (2003) UV photooxidation of NOM: issues related to drinking water treatment, *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, **52**(8), pp.577-586.
- Sarathy, S.R. and Mohseni, M. (2007) The impact of UV/H₂O₂ advanced oxidation on molecular size distribution of chromophoric natural organic matter, *Environmental Science and Technology*, **41**, pp.8315-8320.
- Sinha, S., Amy, G. and Sohn, J. (1997) Reactivity of NOM in forming chlorinated DBPs, *American Water Works Association Annual Conference*, Atlanta
- Sohn, J., Kang, H., Han, J. and Yoon, Y. (2007) Change of molecular weight of organic matters through unit water treatment process and associated chlorination by-products formation, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **12**(5), pp.224-230.
- Thomson, J., Roddick, F.A. and Drikas, M. (2002a) Natural organic matter removal by enhanced photo-oxidation using low pressure mercury vapour lamps, *Water Science and Technology: Water Supply*, **2**(5-6), pp.435-443.
- Thomson, J., Roddick, F.A. and Drikas, M. (2002b) UV photooxidation facilitating biological treatment for the removal of NOM from drinking water, *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, **51**(6), pp.297-306.
- Thomson, J., Roddick, F.A. and Drikas, M. (2004) Vacuum ultraviolet irradiation for natural organic matter removal, *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, **53**(4), pp.193-206.
- Toor, R. and Mohseni, M. (2007) UV-H₂O₂ based AOP and its integration with biological activated carbon treatment for DBP reduction in drinking water, *Chemosphere*, **66**(11), pp.2087-2095.
- 손희중, 노재순, 정철우, 이철우, 강임석 (2004) 상수원 수중에 함유된 천연유기물질 분자량 크기가 염소 소독부산물 생성에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **26**(11), pp.1278 ~ 1290.
- 안영석, 양동진, 채선하, 임재림, 이경혁 (2009) 펄스 UV 램프를 이용한 미생물 소독 및 2-MIB 제거 특성, *상하수도학회지*, **23**(1), pp.69-75.
- 정의택, 손진식, 박순호, 경규선 (2011) Pulse UV 장치를 이용한 이취미 유발물질의 제거, *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 추계학술발표회 논문요약집*, pp.741-742.